

饱水-失水循环作用下岩石劣化特性试验研究

唐小琳¹, 顾正洪¹, 夏微微², 高晓君¹

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要: 合徐高速公路位于江淮地区, 夏季周期性的降雨作用使得合徐高速公路下覆浅埋岩层长期处于被雨水饱和-失水-再饱和的交替过程。为研究江淮地区泥岩和砂岩在水岩相互作用下的劣化特性, 对取自合徐高速公路浅埋地层的泥岩和砂岩试样进行了抗剪、抗压强度实验以及电镜扫描实验, 从宏观和微观的角度共同揭示了不同饱水-失水周期作用下岩石的孔隙结构与岩石强度软化的对应关系及相互印证规律。实验结果表明: 水岩相互作用对泥岩和砂岩的抗剪、抗压强度参数及孔隙参数影响显著。岩石内聚力、内摩擦角随循环次数的增加而迅速衰减, 当循环次数达到某一值之后, 两种岩石的抗剪、抗压强度参数基本稳定。孔隙的数量、总面积、最大孔隙的面积、直径以及岩石表面孔隙率均随着循环次数的增加而增加。基于实验结果, 探讨了水岩相互作用对岩石特性影响的劣化机制, 为研究岩石劣化特性以及合徐高速公路工程稳定性提供了依据。

关键词: 饱水-失水循环; 泥岩和砂岩; 力学特性; 微观结构; 合徐高速公路

中图分类号: TV223.1; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0208-06

Experimental study of rock deterioration characteristics under saturated-loss cycles

TANG Xiaolin¹, GU Zhenghong¹, XIA Weiwei², GAO Xiaojun¹

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Hexu expressway is located in Jianghuai area. The periodic rainfall in summer induced long-term alternative saturation-loss-resaturation processes of shallow-buried rock layer below Hexu expressway. In order to study the deterioration characteristics of mudstone and sandstone in Jianghuai area under water-rock interaction, the experimental study on anti-shear, anti-compression and Scanning electron microscopy were conducted for the samples taken from in situ in order to reveal the corresponding relationship and their validation laws between rock porosity structure and rock strength softness from macroscopic and microscopic levels during different wetting and drying cycles. The results showed that, water-rock interaction had a significant impact on the anti-shear intensity and anti-compression intensity void parameter of mudstone and sandstone. Rock cohesion and internal friction angle decreased fast with the increase of wetting and drying cycle times. When the wetting and drying cycles reached a certain value, the anti-shear intensity and anti-compression intensity of two types of rocks tended to be stable. The pore number, total area, the diameter and area of maximum micro pore and surface porosity increased with the increase of wetting and drying cycles. Based on the experimental results, the rock deterioration mechanism has been discussed, which provided a basis for the study of rock deterioration characteristics and the stability of Hexu expressway.

Key words: saturated-loss cycles; mudstone and sandstone; mechanical properties; microstructure; Hexu Expressway

收稿日期: 2016-08-05; 修回日期: 2016-10-10

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20160259); 中央高校基本科研基金项目(2015QNB10)

作者简介: 唐小琳(1994-), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事水文岩土工程和特殊地基处理等方面的研究。

通讯作者: 顾正洪(1962-), 男, 江苏张家港人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事交通运输专业方向教学和科研工作。

1 研究背景

公路建设作为交通发展中的基础工程,对国民经济起着至关重要的作用,是经济健康有序发展的必要环节^[1-4]。近年来,我国高速公路建设迅速发展,高速公路的规模不断扩大,但由此带来的工程质量问题也日趋严重。高速公路下覆浅埋岩层在地面水和地下水的作用下,会出现明显的强度劣化,进而影响高速公路路基的稳定性,增大养护成本,因此研究水岩相互作用对岩石特性的劣化问题至关重要。

国内外学者对水岩相互作用下公路稳定性及岩石特性变化已经进行了相关研究。宋焱勋^[5]研究了地下水对公路边坡岩体的水力学作用,发现边坡岩体水力联系的不同会造成地下水的力学效应出现明显差别;戴为民^[6]以河北省高速公路为例,探讨了高速公路水损坏的因素及其养护措施;高德彬等^[7]通过现场模拟降雨,研究了降雨对黄土路堑高边坡的侵蚀机制,发现古土壤的破坏方式不同于黄土,且更易于侵蚀;Seedsman^[8]和 Ojo 等^[9]通过不同的实验,研究了水对岩石强度的影响;Karfakis^[10]对不同含水率情况下的岩石进行了强度实验研究,发现不同类型岩石试样的强度参数受到的影响程度也会有差异;陈钢林等^[11]对不同类型的岩石进行了饱水实验和单轴抗压实验,结果表明饱水砂岩力学性能的衰减幅度比花岗闪长岩大,单轴抗压强度和弹性模量分别减少到 20.2% 和 33.3%,而饱水花岗闪长岩仅减少到 64.4% 和 77.4%;李炳乾^[12]运用现场监测和力学实验相结合的方法研究了地下水对岩石特性的影响。然而,目前水岩相互作用对公路稳定性影响的研究大多数以公路边坡、路基及路面为研究对象,对路基下覆浅埋岩层的研究较少。而且,目前大部分的研究仅仅局限于岩石力学特性的改变,从力学和细观两个方面同时对循环饱水-失水作用下岩石劣化特性的研究较少。

本文对取自合徐高速公路浅埋地层的泥岩和砂岩试样进行循环饱水-失水实验、抗压实验及抗剪实验,通过对实验数据的回归分析,研究了不同循环次数下泥岩和砂岩力学特性的变化规律。同时对岩石试样进行了电镜扫描,运用 IPP 专业图像处理技术对 SEM 图像进行处理,获取了岩石微观孔隙结构参数,分析了孔隙结构参数与循环次数的对应关系。将岩石力学特性变化规律与孔隙结构参数变化相结合,揭示了两者的相互印证规律并探讨了水岩相互作用对岩石特性的劣化损伤机制。

2 岩石力学特性实验研究

2.1 试件制备

试样取自合徐高速公路沿线浅埋地层,为避免试样在运输过程中受水的影响,岩石在运往实验室之前首先经过密封处理,在实验室按照国际岩石力学学会的规范^[13],共加工选取 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 砂岩和泥岩试样各 30 个, $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 砂岩和泥岩试样各 12 个。力学实验部分试样如图 1 所示。



图 1 力学实验部分试样

2.2 循环饱水-失水实验

为研究不同循环饱水-失水次数对岩样力学及微观特性的影响,首先需要对岩样进行循环饱水-失水实验,其实验步骤主要如下:

2.2.1 分组及烘干 首先将泥岩和砂岩试样进行分组编号,泥 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 试样分为 6 组,每组 5 个, $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试样分为 6 组,每组 2 个,砂岩采用相同的分组方法。将已分组编号的岩样放入 $100 \sim 105^\circ\text{C}$ 的恒温箱中烘干 24 h,待质量稳定后取出并分别放入密封容器中冷却至室温。

2.2.2 自然浸水 采用自然浸水法对试样进行饱水实验。首先将所需试样放入密封水槽中,每隔 2 h 向密封水槽中注入试样高度 1/4 的水,6 h 后完全浸没试样。经过 24 h 自然浸水后将泥岩和砂岩试样取出并放置于密封容器中。

2.2.3 烘干失水 将进行自然浸水的泥岩和砂岩试样放入 $100 \sim 105^\circ\text{C}$ 的恒温箱中烘干 12h 以上,待试样质量稳定后放入密封容器中冷却至室温。

2.2.4 重复饱水-失水步骤 根据循环饱水-失水实验设计,对部分试样重复步骤 2.2.2 及 2.2.3,直至各组泥岩和砂岩试样根据实验要求满足不同的循环次数。

每组循环饱水-失水的次数分别为 0 次、1 次、2 次、3 次、5 次及 8 次,循环次数少的泥岩和砂岩试样在循环饱水-失水实验后做密闭处理。

2.3 强度实验仪器及方法

岩石强度实验选用中国矿业大学深部岩土力学

与地下工程国家重点实验室 CMT5305 微机控制电子万能试验机,分别对不同循环次数下的泥岩和砂岩进行抗压及抗剪实验研究。强度实验在自然浸水步骤后进行,以测量泥岩和砂岩湿状态下的强度值。抗剪每种循环次数下选择 5 个不同的剪切角度,分别为 40、45、50、55 及 60°。实验过程中采用位移加载的方式,位移加载速率为 0.5 mm/s。试件破坏时,分别记下最大压应力及最大剪应力,进而可以计算抗压强度、内聚力及内摩擦角。

2.4 力学实验结果分析

通过对泥岩及砂岩试样抗压、抗剪强度实验的分析处理,可得不同饱水-失水循环次数下泥岩及砂岩试样力学性能参数如表 1 所示。通过绘图、回归分析可以得到岩石力学性能参数与循环次数的拟合曲线如图 2 所示。

表 1 不同饱水-失水循环次数下岩石力学强度参数表

岩样	循环次数	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗压强度/ MPa
砂岩	0	20.98	32.03	77.14
	1	15.46	29.21	53.90
	2	14.69	28.94	50.31
	3	13.10	28.86	43.24
	5	12.57	28.62	42.59
泥岩	8	12.55	28.40	42.01
	0	6.05	28.68	20.12
	1	4.96	27.40	15.68
	2	4.58	26.69	14.36
	3	4.34	26.64	14.01
泥岩	5	4.29	26.60	13.79
	8	4.27	26.65	13.71

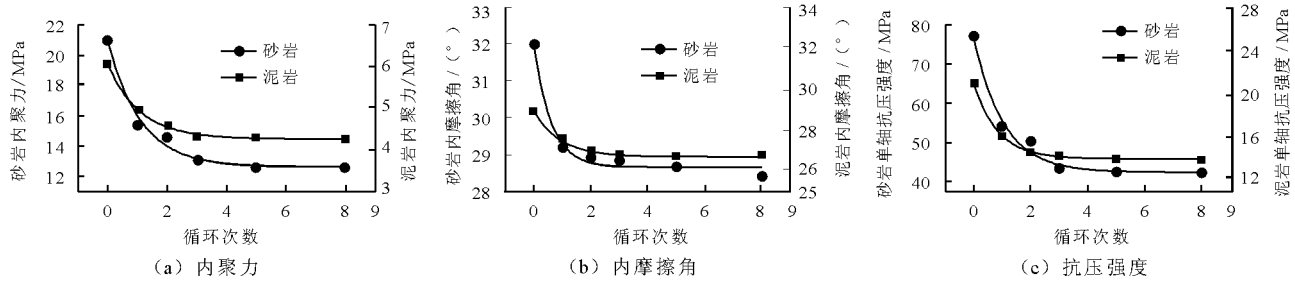


图 2 岩石力学性能参数与饱水-失水循环次数的拟合曲线

由表 1 可知水岩相互作用对砂岩及泥岩的力学性质产生了劣化的影响。在循环饱水-失水 8 次后,砂岩的内聚力由 20.98 MPa 降至 12.55 MPa,减少了 40.18%,内摩擦角减少了 11.33%,抗压强度减少了 45.54%;泥岩的内聚力由 6.05 MPa 降至 4.27 MPa,减少了 29.42%,内摩擦角减少了 7.66%,抗压强度减少了 31.86%。

通过将泥岩和砂岩的力学性能参数与循环次数描点绘图可以发现,砂岩和泥岩的力学性能参数(内聚力、内摩擦角及抗压强度)随着饱水-失水循环次数的增加而降低,且降低的趋势可以用指数函数式(1)表示。经过曲线拟合后各曲线的回归函数如表 2 所示。

$$y = A \cdot \exp(-x/t) + B \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 t 为曲线拟合常数; x 为饱水-失水循环次数

3 岩石微观特性实验研究

3.1 SEM 图像获取与分析

本文电镜扫描实验运用中国矿业大学现代分析

与计算中心的美国 FEI QuantaTM250 型扫描电子显微镜进行,泥岩和砂岩各选取 3 种不同饱水-失水循环次数的岩石试样进行测试。首先将不同循环次数下的岩石试样进行破碎,然后根据实验的要求先从破碎的岩样试块中选取直径或边长、厚度合适的实验样品及观测面,再根据实验规范对选取的每个岩样分别在 500、1000、2000、4000 放大倍数下进行观测,并拍摄电镜扫描图片。本文在不同循环次数下选取 4000 放大倍数的 SEM 图像(见图 3 和图 4)进行分析。

表 2 岩石力学强度参数与循环次数关系式

岩石类型	力学参数	拟合关系式
砂岩	抗压强度	$y = 34.50\exp(-x/1.048) + 42.33$
	内聚力	$y = 8.26\exp(-x/1.11) + 12.62$
	内摩擦角	$y = 3.37\exp(-x/0.60) + 28.64$
泥岩	抗压强度	$y = 6.35\exp(-x/0.84) + 13.76$
	内聚力	$y = 1.78\exp(-x/1.08) + 4.27$
	内摩擦角	$y = 2.12\exp(-x/0.93) + 26.58$

从图 3(a) ~ 3(c) 3 种不同循环次数泥岩的微观结构图像观察发现,泥岩的微观结构与其饱水-失水循环次数有着十分密切的关联。在循环次数为 1 次的情况下,圈定区域内岩样断面不平整,局部呈层状剥离状,分布有孔径约 20 μm 的大孔洞和一定数量的孔径小于 10 μm 的小孔洞,裂隙不发育,孔洞整体连通性较差,颗粒集合体大小不一、形状各异,粒间胶结物充填密实,力学性能较强;循环次数

3 次时,岩石的微观结构有显著变化,颗粒集合体逐步开始解散,新的裂隙大量形成,多形成于不同种类矿物颗粒接触面,颗粒脱落明显,整体结构十分松散,胶结状况严重恶化,局部有细小孔洞形成;经过 8 次饱水-失水循环后,泥岩颗粒间胶结程度相当差,颗粒饱满度极大,颗粒呈紊流状排列,初始微裂纹完全发育,众多细小孔洞贯穿形成微细裂纹,形成了相当松散的细观结构。

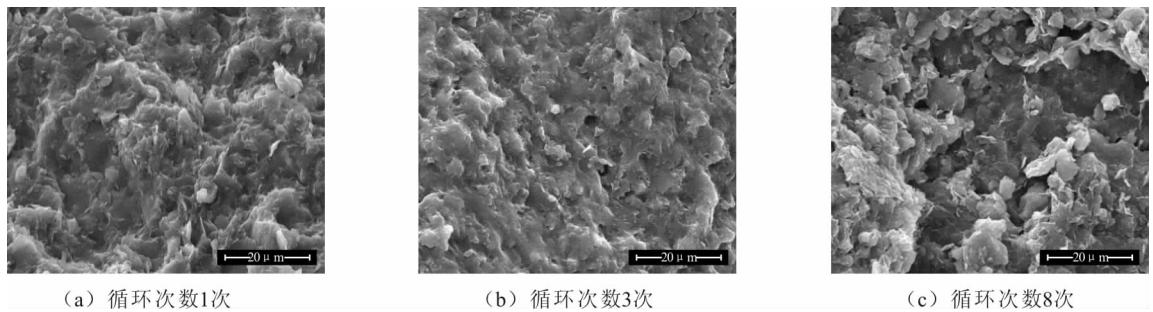


图 3 泥岩不同循环次数时 SEM 图像

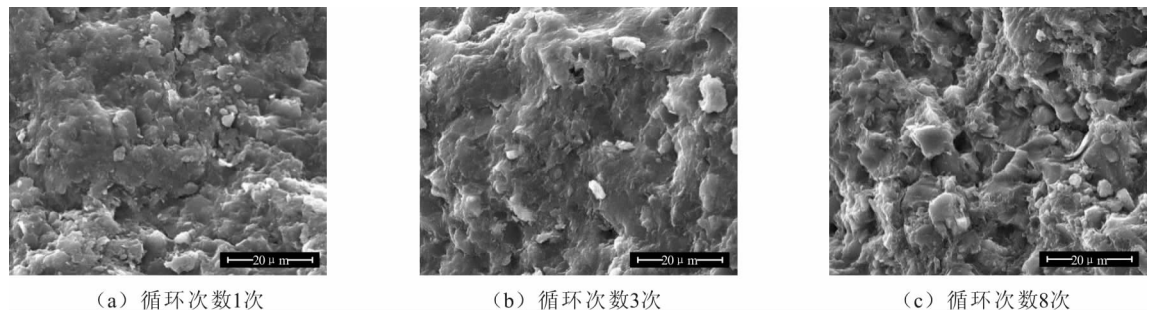


图 4 砂岩不同循环次数时 SEM 图像

通过循环次数 8 次时砂岩微观结构图片(图 4c)与循环次数 1 次时砂岩微观结构图片(图 4a)对比,可以发现饱水-失水循环对砂岩的微观结构有着十分重要的影响。循环 8 次后,砂岩裂隙发育明显,颗粒间胶结程度相当差,颗粒明显脱落,孔洞的数目明显上升,整体结构十分松散,力学性能急剧降低。

3.2 SEM 图像处理

IPP(Image-Pro Plus)是美国 Media Cybernetics 公司开发的专业图像处理分析软件,它可进行图像数据的采集、计数、尺寸测量及分类统计和分析等^[14-15]。利用 Image-pro Plus 软件对 SEM 图像进行分析的主要步骤如下:

3.2.1 去除岩石孔隙图像的噪声 岩石在拍摄 SEM 扫描电镜图像受离散脉冲和椒盐噪声的影响较为严重。最常用的去除脉冲干扰及椒盐噪声的算法是图像处理学中的中值滤波。本文主要通过 Im-

age-pro Plus 软件中的滤波对扫描电镜的图像进行非线性处理,以获得较好的图像效果。

3.2.2 提取岩石中的孔隙-图像分割 图像分析须将电镜扫描初始的灰度图像转换为黑白二值图像,只有准确的转换过程才能保证分析结果可以真实准确地反映泥岩和砂岩的孔隙结构。本研究中采用目视法,即利用 Image-pro Plus 软件中阈值设定功能,通过目测方法不断地进行阈值调试,并且在调试过程中与原始图像进行比较,以获得最佳阈值。同时,为消除个人目测方法带来的误差影响,对同一图像采用多人分别目测选取阈值后取平均值的方法。分割后的泥岩和砂岩二值图像分别如图 5 和图 6 所示,其中白色代表孔隙,黑色代表固体颗粒。

3.2.3 去除二值图像的噪声 通常,即使经过第 1 步对噪声的除去,经过孔隙分割的二值图像依然存在较多的噪点,二值图像中的噪点会使得测量时软件对孔隙造成误判。同时,噪点的存在使得二值图

像在孔隙分析时存在有大量孔隙过小的“空洞”被统计进去,进而对整个统计结果的精度造成影响。

因此在识别喉道前,先要对分割后的二值图像采用第1步相同的方法进行去噪。

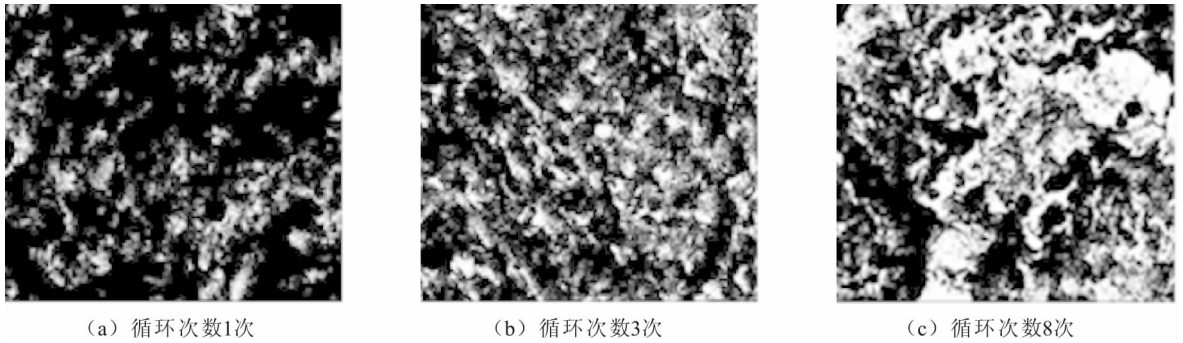


图5 泥岩不同循环次数时 SEM 二值图像

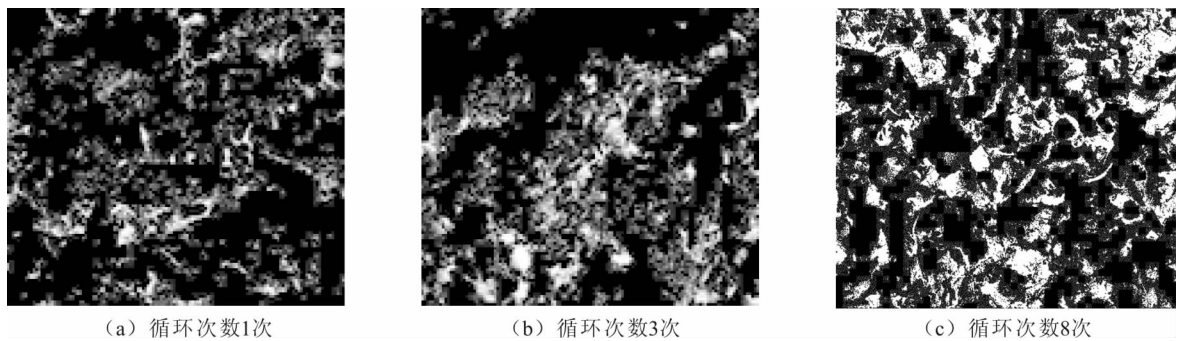


图6 砂岩不同循环次数时 SEM 二值图像

3.2.4 识别喉道 - 分割孔隙 在二值图像的数字处理过程中,会因为软件的原因出现孔隙贯通的现象。在这种情况下,会使得孔隙的统计结果出现一定的误差。此时统计结果的误差主要体现在孔隙数目和单个孔隙面积上,对含水率对孔隙影响的结果分析造成极大的影响。因此需要将连通区域的喉道识别并进行分割。本文中主要采用人工分割孔隙的方法,在分析过程中多次将二值图像与 SEM 扫描图像进行详细的对比,每一幅图片均进行多人识别,以降低人工识别喉道所带来的误差。

3.2.5 计算孔隙各项属性 - 图像分析与理解 利用 Image - pro Plus 专业图像分析软件的图像采集、计数等功能,对泥岩 SEM 图像中孔隙的大小、面积、

数量等进行测量和统计。

3.3 结果分析

泥岩和砂岩试样在不同饱水 - 失水循环次数下 SEM 图像中孔隙的大小、面积、数量统计结果如表 3 所示。根据岩样不同循环次数下孔隙结构参数可得直方图,见图 7。

由表 3 及图 7 可知,随着饱水 - 失水循环次数的增加,泥岩、砂岩的孔隙数目、面积、最大孔隙面积、直径以及表面孔隙率均呈上升趋势。

4 水对岩石劣化特性影响的机制分析

当岩石遇水时,水首先缓慢渗入岩石的初始裂隙与孔隙中。因岩石中不同组分具有不同的膨胀系

表 3 不同循环次数下岩石微观孔隙变化

岩样	循环次数	二值图像	SEM 图像	孔隙数量	孔隙总面积/ μm^2	最大孔隙面积/ μm^2	最大孔隙周长/ μm	表面孔隙率/%
泥岩	1	图 5a	图 3a	185	173.59	14.98	2.49	3.27
	3	图 5b	图 3b	265	186.41	12.15	7.72	4.64
	8	图 5c	图 3c	312	302.44	24.62	12.63	5.48
砂岩	1	图 6a	图 4a	128	104.63	14.43	5.76	1.87
	3	图 6b	图 4b	164	204.27	19.46	9.15	2.46
	8	图 6c	图 4c	286	287.41	25.72	10.53	4.80

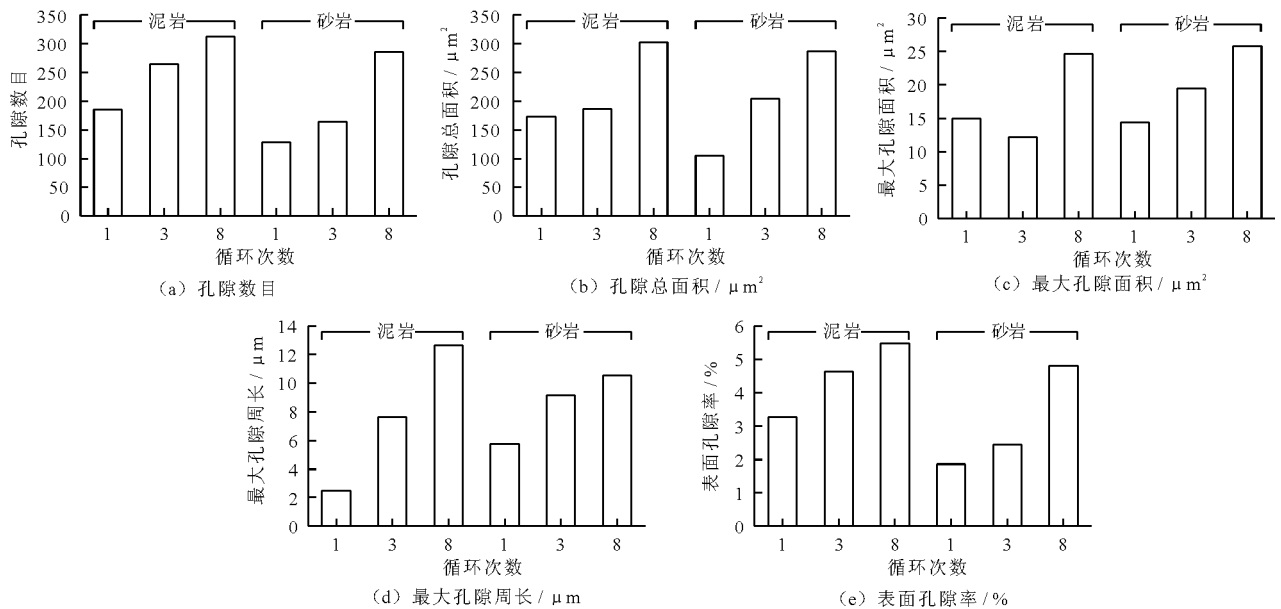


图 7 岩石孔隙参数与循环次数直方图

数,所以在水的作用下,岩石内部会因为物质的不均匀膨胀而产生应力不均,使得岩石内部应力平衡的状态被打破。岩石的初始裂隙会在不均匀应力的作用下继续扩大,同时产生新的裂隙,造成岩石裂隙数目和总面积的上升。随着循环次数的增加,水在岩石内部继续渗流,初始裂隙孔隙与新的孔隙裂隙相贯通,使得最大孔隙的面积和直径也呈现上升的趋势。

饱水-失水循环作用所引起的岩石内部孔隙结构的改变,使得水得以进一步深入岩石内部并与岩石发生作用。水在岩石内部的渗流会减弱岩石颗粒之间的联系,造成岩石内部节理面上摩擦阻力减小。同时,水还会与岩石内部发生复杂的物化反应,进而加剧了饱水-失水循环作用对岩石的损伤劣化。饱水-失水循环作用对岩石所造成的劣化将直接影响到岩石的强度,对工程的稳定性造成影响。

5 结论

本文以合徐高速公路为工程背景,考虑到周期性降雨对高速公路下覆浅埋岩层稳定性的影响,对取自该地区的砂岩和泥岩试样进行了抗压、抗剪强度实验及电镜扫描实验,从宏观和微观的角度分析了饱水-失水循环作用对岩石力学特性及微观特性的影响规律,并探讨了水岩作用对岩石劣化特性影响的机理,结论如下:

(1) 水岩作用对岩石力学特性产生明显的劣化作用。随着饱水-失水循环次数的增加,砂岩和泥

岩的内聚力、内摩擦角及抗压强度均呈指数形式降低。饱水-失水循环 8 次后,砂岩的内聚力、内摩擦角及抗压强度分别减少了 40.18%、11.33% 及 45.54%,而泥岩则相应减少了 29.42%、7.66% 和 31.86%。

(2) 砂岩和泥岩的孔隙的数量、总面积、最大孔隙的面积、直径以及岩石表面孔隙率均随着循环次数的增加而增加。

(3) 水对岩石劣化特性影响的机制分析表明,水对岩石劣化特性的影响主要是因为水对岩石内部的润滑作用以及膨胀性岩石矿物遇水后因膨胀性不同所造成的应力不均,因此导致了岩石抗压、抗剪强度参数的劣化损伤。

参考文献:

- [1] 李海东. 高速公路经济论[D]. 成都:四川大学, 2004.
- [2] 刘勇. 交通基础设施投资、区域经济增长及空间溢出作用-基于公路、水运交通的面板数据分析[J]. 中国工业经济, 2010, (12): 37-46.
- [3] 吕兰明. 高速公路对沿线区域经济发展的影响分析[J]. 中外公路, 2003, 23(1): 96-98.
- [4] 姚士谋, 管驰明, 房国坤. 高速公路建设与城镇发展的相互关系研究初探——以苏南地区高速路段为例[J]. 经济地理, 2001, 21(3): 300-305.
- [5] 宋焱勋. 公路边坡岩体中的水力学作用[J]. 公路交通科技, 2005, 22(S1): 60-62+75.
- [6] 戴为民. 高速公路水损坏成因分析及相应养护对策[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2006(2): 94-97.

5 结 论

(1) 本文对重塑饱和砾质黏土进行室内动三轴试验,综合考虑激振频率、动荷载幅值、土体固结围压三者相互作用下的显示模型,通过拟合发现其能较好地反映土层的实际应力状态。

(2) 累积应变显示模型中的应变沉降指数 b 随着循环次数呈现出递减的规律,在 10000 次循环过后, b 值逐渐趋于稳定。可以预测在数十万以及上百万级循环次数后, b 值的变化幅度不会太大。此时对于长期累积应变的计算产生的误差会比较小。而前 10000 次循环 b 值的变化比较大,尤其是前 1000 次 b 值的变化最为显著,因此在计算土体累积应变时不能取一个相同的 b 值。

(3) 累积孔压显示模型中 N^b 与累积应变模型中 b 值存在同样的变化趋势,建议在计算隧道的施工期间的土体沉降时, b 值与 N^b 不能用长期沉降的值,必须根据循环加载的次数来确定 b 值和 N^b 值。

(4) 本文着重考虑盾构隧道施工期间交通荷载引起的隧道沉降,而并未考虑开挖卸载引起的沉降,这将在以后的研究中进一步讨论。

参考文献:

[1] 范思遐,周奇才,熊肖磊,等. 基于多核模式的隧道沉

降预测[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 291 - 298.

[2] 魏 纲, 裘慧杰, 魏新江. 沉管隧道施工期间与工后长期沉降的数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3413 - 3420.

[3] 李进军. 交通荷载作用下饱和软黏土长期沉降分析[D]. 上海: 同济大学, 2005.

[4] LI Dingqing, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006 - 1013.

[5] Chai Jinchun, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907 - 916.

[6] 李进军, 黄茂松, 土育德. 交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析方法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 1 - 5.

[7] 刘 明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1703 - 1709.

[8] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891 - 895.

[9] 姚兆明. 饱和软土循环累积变形与交通荷载引起的长期沉降[D]. 上海: 同济大学, 2011.

[10] 刘 明. 饱和软粘土动力本构模型研究及地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.

(上接第 213 页)

[7] 高德彬, 倪万魁, 杨泓全. 高速公路黄土路堑高边坡现场冲刷实验研究[J]. 中外公路, 2007, 27(3): 199 - 201.

[8] Seedsman R. The behavior of clay shales in water[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(1): 18 - 22.

[9] Ojo O, Brook N. The effect of moisture on some mechanical properties of rock[J]. Mining Science & Technology, 1990, 10(2): 145 - 156.

[10] Karfakis M G, Akram M. Effects of chemical solutions on rock fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 1253 - 1259.

[11] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效

应的实验研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335 - 342.

[12] 李炳乾. 地下水对岩石的物理作用[J]. 地震地质译丛, 1995(5): 32 - 37.

[13] Ulusay R. The present and future of rock testing: Highlighting the ISRM suggested methods[M]. West Berlin: Springer International Publishing, 2012: 1 - 22.

[14] 张季如, 祝 杰, 黄 丽, 等. 土壤微观结构定量分析的 IPP 图像技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4): 90 - 93.

[15] 綦建峰, 隋旺华, 张改玲, 等. 基于 SEM 图像处理红层砂岩孔隙度及分维数计算分析[C] // 全国工程地质学术大会, 2014.